

Perbandingan Deformasi dan Tegangan Sisa pada *Socket-Weld* dan *Butt-Weld* Menggunakan Metode Elemen Hingga

Dimas Prasetyo N., Totok Yulianto.

Jurusan Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: totoky@na.its.ac.id

Abstrak— Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui deformasi dan tegangan sisa pada sambungan pipa-*flange* dengan variasi sambungan *socket-weld*, *butt-weld* dan urutan pengelasan untuk material stainless steel. Penelitian dilakukan dengan pendekatan numerik. Validasi hasil dilakukan dengan dengan hasil percobaan yang dilakukan oleh Xiangyang Lu untuk validasi struktur dan percobaan S. Murugan untuk validasi termal. Hasil variasi sambungan dan urutan pengelasan yang telah dilakukan diperoleh kesimpulan bahwa pada sambungan *socket-weld* (urutan pengelasan loncat) memiliki nilai tegangan sisa lebih besar dibandingkan sambungan *butt-weld* (urutan pengelasan loncat), sedangkan deformasi yang terjadi sambungan pada *socket-weld* (urutan pengelasan loncat) memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan sambungan *butt-weld* (urutan pengelasan loncat).

Kata Kunci—*Butt-weld*, *Socket-weld*, Tegangan Sisa, Deformasi, , metode elemen hingga.

I. PENDAHULUAN

SISTEM perpipaan sangat penting sebagai salah satu bagian penting pada penyaluran fluida ataupun gas dalam kapal. Sistem perpipaan sambungan antara pipa. penyambungan antara pipa dengan *flange* biasanya dilakukan dengan pengelasan. Pengelasan sambungan pipa dengan *flange* akan menyebabkan terjadinya distorsi (deformasi) dan tegangan sisa selama proses pengelasan dan pendinginan. Proses pengelasan menyebabkan pemanasan tinggi yang tidak merata pada bagian-bagian yang akan disambung tersebut kemudian mengalami penurunan suhu secara bertahap. Pemanasan lokal yang tidak merata dan laju pendinginan bertahap menghasilkan penyebaran panas, deformasi dan tegangan sisa. Untuk mengetahui besarnya deformasi yang terjadi salah satunya dengan melakukan penelitian variasi jenis sambungan pengelasan dan urutan pengelasan baik *socket-weld* maupun *butt-weld* dan juga penentuan urutan pengelasan (*welding sequence*).

Deformasi dan tegangan sisa yang terlalu besar pada sambungan las akan mempengaruhi tegangan patah getas, kekuatan tekuk struktur las dan proses pengerjaan selanjutnya sehingga bisa terjadi kebocoran pipa. Untuk itu dilakukan simulasi metode elemen hingga (*finite element method*) pada tahap desain sehingga deformasi dan tegangan sisa yang terjadi dalam pengelasan dapat di minimalisasi.

Tegangan sisa adalah tegangan yang bekerja pada benda setelah semua beban *external* dan kondisi batas telah dihilangkan [1]. Pada pengelasan pipa urutan pengelasan mempengaruhi besarnya tegangan sisa dan deformasi [2]. Dalam pemodelan, pengelasan menggunakan jenis sambungan *butt-join* yang di variasikan dengan urutan pengelasan dan jumlah las titik (*tack weld*). Kesimpulan untuk deformasi yang paling kecil terjadi pada urutan pengelasan loncat (*quarter circumferential welding*) [3]. Urutan pengelasan loncat mengurangi terjadinya deformasi dan tegangan sisa pada pengelasan pipa sambungan-T [4]. Juga pada pengelasan pipa dengan *elbow* dengan divariasikan jumlah las titik dan urutan pengelasan didapatkan jumlah las titik dan urutan pengelasan mempengaruhi tegangan sisa serta deformasi pada pengelasan pipa dengan *elbow* [5].

II. DASAR TEORI.

A. Tegangan Sisa

Tegangan sisa selalu muncul apabila sebuah material dikenai perubahan temperatur *non-uniform*, tegangan-tegangan ini disebut tegangan panas. Untuk membahas masalah pengelasan, tegangan sisa yang akan ditinjau adalah tegangan sisa yang ditimbulkan dari distribusi regangan non-elastik yang tidak merata pada material. Tegangan sisa pada logam dapat terjadi karena banyak hal selama proses produksi, antara lain :

- Material yang termasuk bentuk pelat dan batangan dikenal proses *roll*, *casting*, *forging*.
- Selama pembentukan bagian-bagian metal oleh proses-proses seperti *bending*, *grinding*, *shearing*, dan *machining*.
- Selama proses fabrikasi, seperti pengelasan[1].

Tegangan akibat panas dapat dihitung berdasarkan besarnya regangan yang terjadi dengan menggunakan hubungan yang terjadi antara regangan dan tegangan akibat panas. Untuk *homogeneous isotropic material*, perubahan temperature ($\Delta T = T - T_{ref}$) menghasilkan regangan linier yang uniform ke segala arah. Berikut ini merupakan perumusan regangan yang disebabkan oleh panas :

$$\epsilon_t = (\Delta T) \quad (1)$$

dimana ϵ_t , yang merupakan salah satu material properties, adalah koefisien muai. Dalam satuan SI, ini dinyatakan dalam satuan per degree celsius. Untuk material isothropic, perubahan temperature tidak menghasilkan tegangan geser.

Tegangan yang terjadi pada pengelasan dikarenakan oleh hal ini. Pada saat pelat bebas dipanaskan secara *uniform*, maka yang timbul adalah regangan normal, bukanlah tegangan yang ditimbulkan oleh panas. Namun bila pelat tersebut tidak lagi bebas atau telah diberikannya kondisi batas yang sebenarnya, atau material tersebut menampakkan anisotropik bahkan pada saat pemanasan yang *uniform*, tegangan yang diakibatkan oleh panas akan muncul [6].

Berikut ini adalah perumusan regangan dan tegangan (x, y) yang diakibatkan oleh panas :

$$\epsilon_x = E/(1 - \nu^2) [\epsilon_x + \nu \epsilon_y - (1 + \nu) \alpha (T)] \quad (2)$$

$$\epsilon_y = E/(1 - \nu^2) [\epsilon_y + \nu \epsilon_x - (1 + \nu) \alpha (T)] \quad (3)$$

Dari rumus diatas dapat dijelaskan bahwa perbedaan temperatur yang menyebabkan tegangan dan regangan pada pengelasan. Pada saat proses pendinginan setelah pengelasan, suhu material akan berangsur-angsur turun sehingga sama dengan suhu ruangan, sehingga proses pemuaian terhenti. Dengan tidak adanya perbedaan temperature ($\Delta T = 0$), maka tegangan yang dihasilkan inilah disebut dengan tegangan sisa.

B. Deformasi pada Pengelasan

Adanya pencairan, pembekuan, pengembangan thermal, perpindahan dan penyusutan dalam proses pengelasan, maka pada konstruksi las selalu terjadi perubahan bentuk atau deformasi. Faktor-faktor yang mempengaruhi terbentuknya deformasi las dapat dibagi dalam dua kelompok, yaitu kelompok pertama yang sangat erat hubungannya dengan masukan panas pengelasan dan kelompok kedua yang disebabkan oleh adanya penahan atau penghalang pada sambungan las. Faktor yang termasuk dalam kelompok pertama adalah masukan panas pengelasan (yang ditentukan oleh tegangan listrik, aliran listrik, kecepatan serta ukuran serta jenis elektroda), cara pengelasan, suhu pemanasan mula, tebal pelat, geometri sambungan serta jenis jumlah lapisan dari lasan. Sedangkan yang termasuk dalam kelompok kedua adalah : bentuk, ukuran serta susunan dari batang-batang penahan dan welding sequence atau urutan pengelasan.

Berikut perubahan bentuk terjadinya deformasi dalam pengelasan [7]:

- Longitudinal shrinkage*, yaitu penyusutan material yang searah atau sejajar dengan garis las.
- Rotational distortion*, merupakan distorsi sudut dalam bidang pelat yang berkaitan dengan perluasan bidang panas.
- Transverse shrinkage*, yaitu penyusutan tegak lurus terhadap garis las.
- Buckling distortion*, merupakan fenomena yang berkaitan dengan kompresi yang berkenaan dengan panas dan menyebabkan ketidakstabilan ketika pelatnya tipis.
- Angular change/Angular shrinkage*, yaitu karena adanya distribusi panas yang tidak merata pada kedalaman material sehingga menyebabkan terjadinya distorsi (perubahan sudut).

- Longitudinal bending distortion*. Yaitu distorsi dalam bidang yang melalui garis las dan tegak lurus terhadap pelat

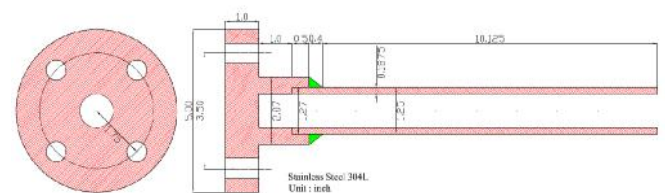
C. Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan dalam bidang rekayasa seperti geometri, pembebanan dan sifat-sifat dari material yang sangat rumit. Hal ini sulit diselesaikan dengan solusi analisa matematis. Pendekatan metode elemen hingga adalah menggunakan informasi-informasi pada titik simpul (*node*). Dalam proses penentuan titik simpul yang disebut dengan pendeskritan (*discretization*), suatu sistem di bagi menjadi bagian-bagian yang lebih kecil, kemudian penyelesaian masalah dilakukan pada bagian-bagian tersebut dan selanjutnya digabung kembali sehingga diperoleh solusi secara menyeluruh.

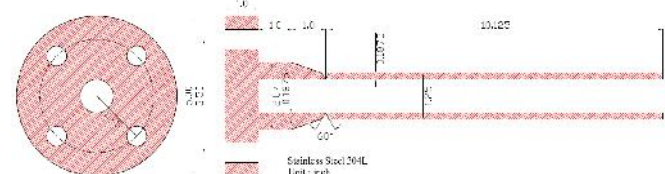
III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Geometri Model

Untuk penelitian ini dilakukan pemodelan sambungan pengelasan pipa pada sambungan pipa dengan *flange* tipe sambungan *butt joint* dengan variasi bentuk sambungan *socket-weld* dan variasi urutan pengelasan (*welding sequence*). Sambungan pengelasan dimodelkan dengan menggunakan elemen hingga. Analisa dilakukan akibat pembebanan thermal dan struktural



Gambar. 1. Geometri model *socket-joint*



Gambar. 2. Geometri model *butt-joint*

B. Data Material Propertis

Pada pemodelan simulasi pengelasan dilakukan dengan dua tahap. Tahap pertama adalah pemodelan termal dimana input yang digunakan berhubungan dengan suhu pengelasan seperti *thermal properties* material dan *heat flux*. Sedangkan tahap kedua adalah pemodelan struktural dimana input yang digunakan berhubungan dengan *mechanical properties* material[3].

Tabel 1. *Thermal Properties SS304l*

Thermal Properties			
T (°C)	k (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	c (J kg ⁻¹ °C ⁻¹)	(kg m ⁻³)
20	15	442	442
200	17.5	515	515
400	20	563	563
600	22.5	581	581
800	25.5	609	609
1000	28.3	631	631
1200	31.1	654	654
1340	33.1	669	669
1390	66.2	675	675
2000	66.2	675	675

T = temperature; c = specific heat; k = conductivity; p = density

Tabel 2. *Mechanical Properties SS304l*

Mechanical Properties				
T (°C)	E (GPa)	ν	γ (Mpa)	(x10 ⁻⁶ °C ⁻¹)
20	200	0.278	230	17
200	185	0.288	184	18
400	170	0.298	132	19.1
600	153	0.313	105	19.6
800	135	0.327	77	20.2
1000	96	0.342	50	20.5
1200	50	0.35	10	20.7
1340	10	0.351	10	20.11
1390	10	0.353	10	20.12
2000	10	0.357	10	20.16

T = temperature; ν = Poisson's ratio; E = elastic modulus; γ = thermal expansion

C. Data Parameter Pengelasan

- Layer 1
 - Kecepatan pengelasan: 1,76 mm/detik
 - Kuat arus : 65 Ampere
 - Voltage : 10 Volt
 - Efisiensi : 0.8
 - Diameter elektroda : 2.4 mm
- Layer 2
 - Kecepatan pengelasan: 2.27 mm/detik
 - Kuat arus : 145 Ampere
 - Voltage : 10 Volt
 - Efisiensi : 0.8
 - Diameter elektroda : 2.4 mm

D. Perhitungan Heat Flux

Untuk perhitungan *heat flux* digunakan beberapa persamaan sebagai berikut:

$$Q = U I$$

$$A_f = b \times v \times t$$

$$A_e = \frac{1}{4} f D^2$$

$$A_l = p \times l$$

$$q_e = \frac{Q}{A_e}$$

$$q_l = q_e \frac{A_l}{A_f}$$

dimana:

Q = *heat input* bersih

= efisiensi pengelasan

U = voltase

I = kuat arus

A_f = luas area pembebanan

b = lebar kampuh

v = kecepatan pengelasan

t = waktu pengelasan per elemen

A_e = luas penampang elektroda

D = diameter elektroda

A_l = luas satu elemen

p = panjang satu elemen

l = lebar satu elemen

q_l = *heat flux*

dari hasil perhitungan diperoleh besarnya *heat flux* untuk masing-masing layer adalah:

1. Model *butt-joint*

Layer ke-1 = 2.01E+07 Watt/ m²

Layer ke-2 = 1.41E+07 Watt/ m²

2. Model *socket-joint*

Layer ke-1 = 1.182E+07 Watt/ m²

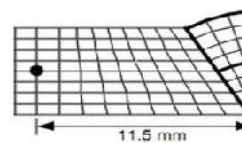
Layer ke-2 = 1.408E+07 Watt/ m²

IV. KONVERGENSI DAN VALIDASI

A. Konvergensi Mesh Elemen

Pembagian elemen (*meshing*) yang digunakan harus bisa mendapatkan hasil yang terbaik. Maka, perlu dilakukan penyesuaian jumlah elemen dengan hasil yang didapatkan sehingga didapatkan hasil dengan *error* yang kecil.

Mesh elemen yang digunakan dalam penelitian ini adalah penyesuaian jumlah elemen dengan suhu maksimal pada titik tertentu, dimana dicari jumlah elemen yang menghasilkan suhu maksimal pada titik tertentu sampai bernilai konvergen. Pada penelitian kali ini, titik pengamatan untuk konvergensi mesh adalah sama dengan pengamatan yang dilakukan penelitian yang dilakukan oleh Murugan[8]. pada penelitian Murugan[8]. Harga temperatur maksimal

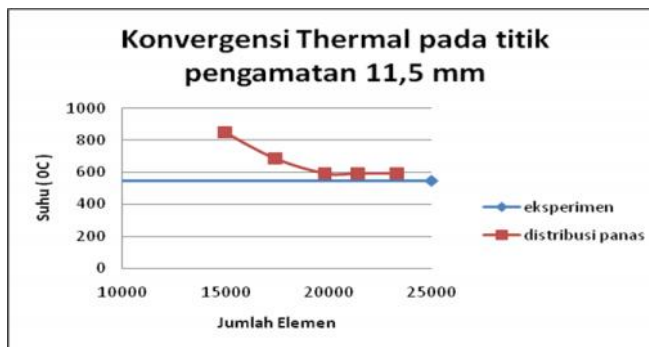


Gambar. 3. Letak titik pengamatan pada penelitian Murugan[8].

pada titik pengamatan 11.5 mm adalah 543.26 °C.

Dari gambar 4 dapat dilihat besarnya suhu maksimal pada titik pengamatan 11.5 mm dari *weld center line* yang konvergen adalah pada jumlah elemen 19824. Pada jumlah elemen tersebut sudah tidak terjadi peningkatan nilai yang signifikan terhadap jumlah elemen diatasnya sehingga pada pemodelan ini diambil jumlah elemen 19824 dengan harga temperature maksimal adalah 592.746 °C. Serta besarnya *error* yang terjadi pada jumlah elemen tersebut yaitu 9.108% dari hasil penelitian pada titik 11.5 mm yang dilakukan oleh Murugan[8]. Sehingga jumlah elemen tersebut dijadikan

acuan untuk pembuatan dan pembagian meshing model untuk semua variasi dalam penelitian penelitian ini.

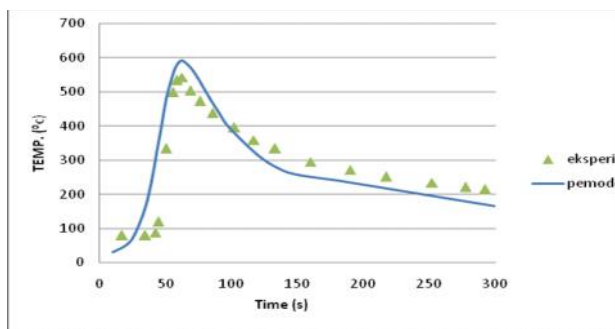


Gambar. 4. Konvergensi thermal pada titik pengamatan 11.5 mm.

B. Validasi

Pada penelitian ini tidak dilakukan pengujian sendiri namun hanya dilakukan simulasi proses variasi jenis sambungan dan urutan pengelasan dengan menggunakan software berprinsip elemen hingga sehingga harus dilakukan validasi dengan penelitian yang dilakukan oleh para peneliti sebelumnya dengan data yang sama.

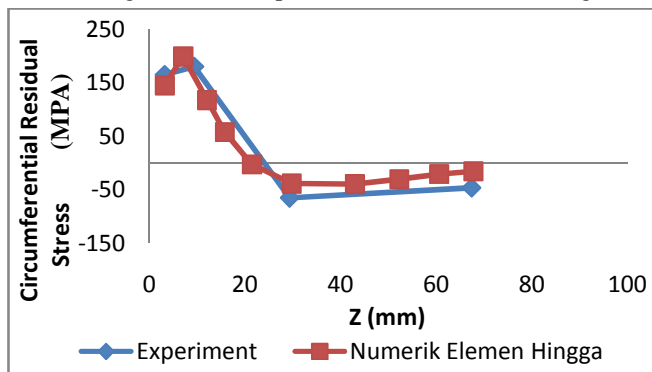
Hasil dari pemodelan thermal akan divalidasi



Gambar. 5. Grafik perbandingan distribusi panas pemodelan dengan penelitian Murugan[8] pada titik pengamatan 11.5 mm.

dengan penelitian yang dilakukan oleh Murugan[8] sedangkan untuk pemodelan struktur akan divalidasi dengan penelitian Xiangyang Lu[6].

Dari gambar 5 dapat dilihat bahwa kontur grafik



Gambar. 6. Grafik perbandingan tegangan sisa pemodelan dengan penelitian Xiangyang Lu[3]

distribusi panas layer 1 hasil pemodelan ini memiliki

kecenderungan bentuk yang sama dengan grafik percobaan yang dilakukan oleh Murugan[8].

Berdasarkan gambar 6 tegangan sisa yang terjadi pada pemodelan memiliki kecenderungan bentuk yang sama dengan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Xiangyang Lu[3]. Tetapi tegangan sisa maksimal yang dihasilkan tidak memiliki nilai yang sama. Pada eksperimen Xiangyang Lu[3] tegangan maksimal sebesar 180.3 MPa sedangkan pada pemodelan tugas akhir menggunakan elemen hingga tegangan maksimal sebesar 199.47 Mpa sehingga memiliki selisih ± 19.17 Mpa atau ± 10.63 %. Tegangan sisa berupa tegangan tarik (tegangan positif) terjadi pada garis las dan daerah terkena pengaruh panas (HAZ) lalu berubah menjadi tegangan tekan (tegangan negatif).

V. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah model validasi dinyatakan valid selanjutnya adalah dilakukan pemodelan variasi yang meliputi variasi jenis sambungan *socket-joint* dan variasi urutan pengelasan.

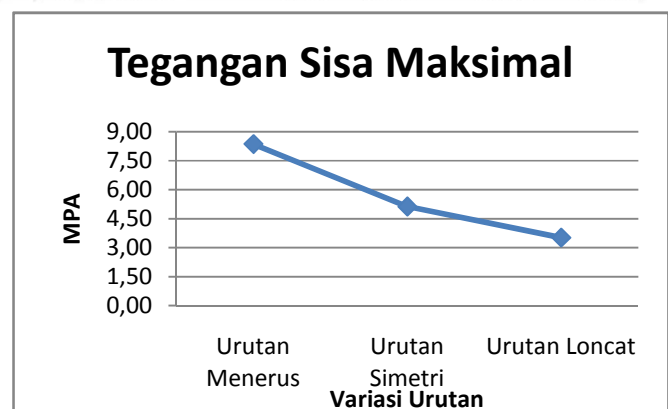
Semua variasi pemodelan pengelasan GTAW 2 kali pass dengan nilai *heat input* serta kondisi pengelasan yang diasumsikan tetap. Berikut hasil pemodelan variasi yang telah dilakukan.

A. Sambungan Socket

Berikut akan ditampilkan hasil dari distribusi panas, tegangan sisa dan deformasi variasi sambungan *socket*.

Tabel 3. Hasil analisa variasi pengelasan socket joint

No	Hasil Analisa	Variasi Urutan		
		Urutan Menerus	Urutan Simetri	Urutan Loncat
1	Analisa Thermal			
	Suhu Maksimal [°C]	1424	1426	1426
2	Deformasi			
	Deformasi maksimal sumbu-x (±mm)	0.11	0.059	0.041
	Deformasi maksimal sumbu-y (±mm)	0.058	0.0204	0.051
	Deformasi maksimal sumbu-z (±mm)	0.15	0.071	0.05
	Deformasi Total maksimal (±mm)	0.194	0.0951	0.0826
3	Tegangan Sisa Total			
	Tegangan Maksimal [MPa]	8.36	5.17	3.51
	Tegangan Minimal [MPa]	1.21E-03	1.71E-04	5.4E-04



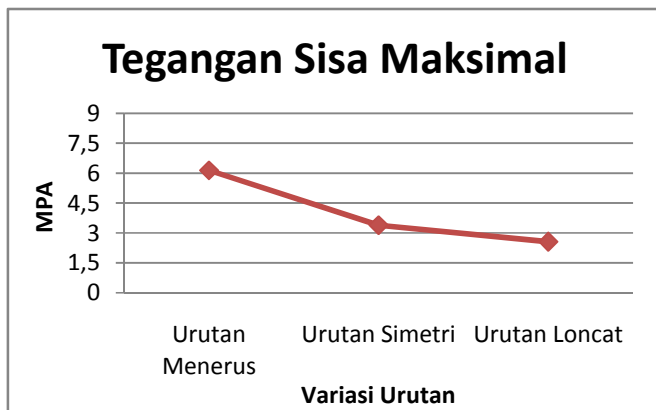
Gambar. 7. Grafik tegangan sisa maksimal pada variasi sambungan *socket*.

B. Sambungan Butt

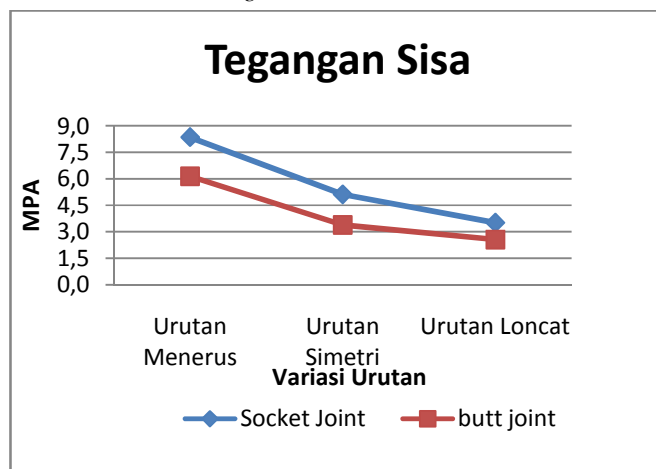
Berikut akan ditampilkan hasil dari distribusi panas, tegangan sisa dan deformasi variasi sambungan *butt*.

Tabel 4. Hasil analisa variasi pengelasan *socket joint*

PENGELASAN BUTT JOINT				
No	Hasil Analisa	Variasi Urutan		
		Urutan Menerus	Urutan Simetri	Urutan Loncat
1	Analisa Thermal Suhu Maksimal (°C)	1456	1456	1412
2	Deformasi			
	Deformasi maksimum sumbu-x (± mm)	0.274	0.227	0.109
	Deformasi maksimum sumbu-y (± mm)	0.193	0.2	0.151
	Deformasi maksimum sumbu-z (± mm)	0.149	0.154	0.052
	Deformasi maksimum Total (± mm)	0.367	0.255	0.125
3	Tegangan Sisa Total			
	Tegangan Maksimal (MPa)	6.14	4.36	2.56
	Tegangan Minimal (MPa)	8.63 E 04	2.14 E 05	5.45 E 04

Gambar 8. Grafik tegangan sisa maksimal pada variasi sambungan *butt*.

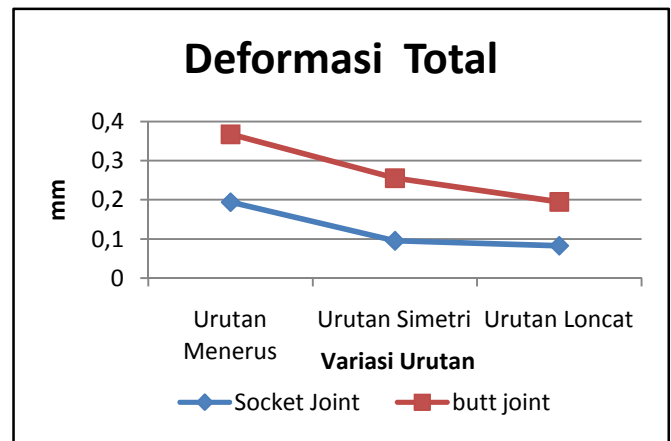
C. Analisa Perbandingan



Gambar 9. Grafik perbandingan tegangan sisa maksimal

Berdasarkan analisa hasil dari pemodelan yang telah dilakukan dapat dilihat untuk tegangan sisa pada kedua jenis pengelasan, pengelasan *socket joint* lebih menghasilkan tegangan sisa yang lebih besar dari jenis pengelasan *butt joint* untuk semua jenis variasi urutan pengelasan. Berbanding terbalik dengan tegangan sisa, pada pengelasan *socket joint* deformasi yang dihasilkan lebih kecil dari pengelasan *butt joint* dengan deformasi paling kecil dihasilkan oleh pengelasan *socket joint* dengan urutan pengelasan loncat. Dengan menilai dari proses pemodelan yang telah dilakukan dengan hasil yang didapat, maka dapat diambil kesimpulan bahwa variasi yang terokemendaskan

untuk pengelasan pipa dengan *flange* adalah pengelasan *socket joint* dengan urutan pengelasan loncat.



Gambar 10. Grafik perbandingan deformasi total

VI. KESIMPULAN

Berdasarkan dari hasil pemodelan pengelasan pipa dengan *flange* dan dari hasil analisa yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Pada pengelasan sambungan *socket* menghasilkan deformasi yang lebih kecil dari sambungan *butt*.
2. Hasil deformasi terkecil terjadi pada jenis pengelasan sambungan *socket* dengan urutan pengelasan loncat yaitu 0.0826 mm.
3. Pada pengelasan sambungan *butt* menghasilkan tegangan sisa yang lebih kecil dari sambungan *socket*.
4. Hasil tegangan sisa terkecil terjadi pada jenis pengelasan *butt joint* dengan urutan pengelasan loncat yaitu sebesar 2.56 MPa.
5. Variasi urutan pengelasan yang menghasilkan tegangan sisa dan deformasi yang paling baik yaitu urutan pengelasan yang menghasilkan tegangan sisa dan deformasi paling kecil adalah urutan pengelasan loncat untuk masing-masing jenis sambungan pengelasan.
6. Jenis pengelasan yang dipilih adalah pengelasan sambungan *socket joint* dengan urutan pengelasan loncat karena deformasi yang terjadi terkecil walaupun tegangan sisa yang terjadi lebih besar dari *butt joint* dengan urutan pengelasan loncat dikarenakan tegangan yang terjadi masih aman atau kurang dari tegangan ultimate bahan.

Hasil dari penelitian ini diharapkan mampu menjadi salah satu acuan untuk studi tentang studi mengenai pengelasan pada pipa dengan *flange*. Karena terdapat banyaknya kekurangan dalam Penelitian ini dan agar mendapatkan hasil yang lebih baik di masa mendatang, maka penulis memberikan beberapa saran untuk dikembangkan pada penelitian selanjutnya, yaitu :

1. Melakukan simulasi dengan memberikan variasi besar diameter pipa.
2. Melakukan simulasi dengan memberikan variasi tebal pipa yang akan dianalisa.

3. Melakukan simulasi dengan memberikan *tack weld* sebelum dilakukan pengelasan.
4. Melakukan perbandingan dengan dilakukan *pre-heating*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Masubuchi. K, “*Analysis of Welded Structures*,” Pergamon Press (1980).
- [2] Purwanto,S, “*Analisa Distorsi, Tegangan Sisa dan distribusi panas dengan Metode Elemen Hingga pada Pengelasan Sambungan Pipa*”, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.(2007).
- [3] Lu. X, “*Influence of Residual Stress on Fatigue Failure of Welded Joints*,” North Carolina State University (2002).
- [4] Andika,A.D,” *Penentuan Welding Sequence Terbaik pada Pengelasan Sambungan-T pada Sistem Perpipaan Kapal dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga*”, Institut Teknologi Sepuluh Nopember,Surabaya.(2010).
- [5] Ghozali,M.W,” *Analisa Pengaruh Las Titik Dan Urutan Pengelasan Terhadap Distorsi Dan Tegangan Sisa Pada Pengelasan Sambungan Pipa Elbow Dengan Metode Elemen Hingga*”, Institut Teknologi Sepuluh Nopember,Surabaya.(2011).
- [6] Ugural,A.C,” *Stresses in Plate and Shell*”, W.C Brown Pub.Co,(1999)
- [7] Pilipenko. A, “*Computer Simulation of Residual Stress and Distortion of Thick Plates in Multi-Electrode Submerged Arc Welding Their Mitigation Techniques*,” Department of Machine Design and Materials Technology Norwegian University of Science and Technology, Trondheim,Norway (2001).
- [8] Murugan, S., Rai, S. K., Kumar, P. V., Jayakumar, T., Raj, B., & Bose, M, “*Temperature Distribution and Residual Stresses Due to Multipass Welding in Type 304 Stainless Steel and Low Carbon Steel Weld Pads*,” International Journal of Pressure Vessels and Piping (2001).